

# 低温環境における可動永久磁石形リニア振動アクチュエータの静推力および動推力特性

## Static and Kinetic Thrust Characteristics of a Linear Oscillatory Actuator with a Permanent Magnet at Low Temperature

青木昭夫・和多田雅哉・鳥居 肅・山根公高・海老原大樹

武蔵工業大学, 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 (〒158-8557)

A. Aoki, M. Watada, S. Torii, K. Yamane, and D. Ebihara

Musashi Institute of Technology, 1-28-1 Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557

This paper reports the static and the kinetic thrust characteristics of a linear oscillatory actuator with a permanent magnet at low and room-temperatures. The static and kinetic thrust with respect to the position were measured with a variable exciting current. Room-temperature was maintained by water cooling, and low temperature was obtained by using liquid nitrogen. The detent force at low temperature was larger than that at room-temperature. The static thrust excluding the detent force at room-temperature was larger than that at low temperature, and a linear dependence at low and room-temperatures was exhibited between the static thrust excluding the detent force and the magnetomotive force.

**Key words:** low temperature, linear oscillatory actuator, static thrust, kinetic thrust, detent force

### 1. はじめに

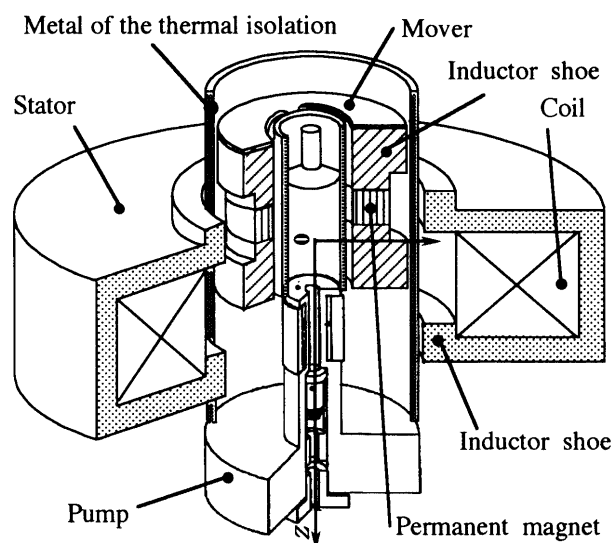
二酸化炭素排出量の少ない自動車として、天然ガス自動車、水素自動車、燃料電池式電気自動車が開発されている。これら自動車の燃料に、液化天然ガスや液体水素などの低温液体を使用するためには、低温液体用ポンプが必要である。この低温液体用ポンプは、燃料タンク内の低温液体に外部から熱を与えないことや、吐出圧力を高圧にできることが求められる。これらの仕様に対し筆者らは、シリンダ・ピストン形低温液体用ポンプの駆動部に、リニア振動アクチュエータを用いることを考案した<sup>1), 2)</sup>。リニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator: 略称 LOA) は、可動子に対する直線的な往復運動を非接触で行える。ポンプ部のシリンダを、LOA の可動子に組込むことにより、ポンプ作動に必要な往復運動が、クランク機構などを利用せずに得られる。また、燃料タンクの断熱壁を間において、低温液体中の可動子 (シリンダ内蔵) を非接触で運動させることが可能になり、燃料タンク外部からの熱が、低温液体用ポンプを通して低温液体へ伝わることを防げる。従来方式の実験機との比較によれば、全熱投入量の 70% が、低温液体へ伝わることを防げる<sup>3)</sup>。

本研究の目的は、LOA を用いた非接触の駆動による、シリンダ・ピストン形低温液体用ポンプの実用化の可能性を探ることにある。LOA の可動子は、小形・高推力化のため、永久磁石 (ネオジウム磁石) を組込む構造とした。本論文では、初めに、

LOA の構造について述べる。次に、永久磁石を使用した LOA の基本特性として、低温および常温時の推力特性について述べる。さらに、可動子のストローク各位置および起磁力に対する静推力、動推力の特性などに関する検討結果について述べ、低温液体用ポンプへの LOA 一体化の可能性につき論じる。なお本論文における低温とは、液体窒素の温度である。

### 2. リニア振動アクチュエータの構造と仕様

Fig. 1 に LOA の構造を示し、その仕様を Table 1 に与える。LOA は、固定子と可動子により構成される。固定子側には、単巻きの励磁コイルがある。固定子の上側と下側部分には、インダクタ (突極) を設けている。励磁コイルに流す励磁電流の向きにより、固定子のインダクタにおける磁極の極性が変化する。可動子は、軸方向に着磁した永久磁石を、上側と下側のインダクタによって挟む構造である。固定子に対する可動子の往復運動は、固定子と可動子の磁極間における引力と反発力によって行われる。そのため駆動周波数は、励磁電流の向きが変化する周期に依存する。可動子が、Fig. 1 の位置  $z=0$  mm から、固定子の内部方向 (上側から下側) へ移動することにより、シリンダ・ピストン形ポンプ部が低温液体を吐出する。



**Fig. 1** Structure of the linear oscillatory actuator. This is the position  $z=0$  mm. The mover goes into the stator.

### 3. 静推力および動推力の測定方法

#### 3.1 静推力の測定方法

ここでの静推力は、可動子が停止することなく、ごく低速で移動する（速度に関連した各種影響を無視できる）場合の推力を示すこととする。定電流源を使用し、励磁コイルに直流の励磁電流を流す。起磁力の大きさと方向を一定にした状態で、停止することなく低速で、可動子を移動させる。本実験では、15 mm のストロークに約 90 秒の時間をかけて、可動子を移動させる。そのため、移動速度に関連した各種影響は、無視できると考えている。なお起磁力の大きさは、0.5 kA から 5 kA まで、0.5 kA ごとに設定する。Fig. 2 は静推力の測定装置を示す。可動子、ロードセル（荷重変換器）、およびターンバックル（送りねじ構造部）が、実験用に設けたロッドにより連結される。可動子は、ターンバックルに設けた送りねじにより移動する。静推力は、ロードセルにより引張および圧縮方向に関して測定する。また可動子の位置は、レーザ変位計により測定する。なお、レーザ変位計およびロードセルからの出力は、パソコンを用いた計測装置で処理される。

往路および復路における可動子の位置に対する静推力の測定結果から、可動子の各位置における発生推力を求める。起磁力の大きさと方向は、往路および復路において同一である。したがって、可動子の同一位置における往路の発生推力と復路の発生推力の大きさは等しく、発生方向は同一である。摩擦力は、可動子の移動方向の相違から、往路および復路の可動子の同一位置において、大きさが同じで方向のみが異なると考えられる。したがって、往路および復路における発生推力を  $F_1$ 、摩擦力を  $F_2$ 、往路の静推力を  $F_3$ 、復路の静推力を  $F_4$  で表せば、以下の関係が、往路および復路の可動子の同一位置で成立する。

$$F_3 = F_1 - F_2 \quad (1)$$

$$F_4 = F_1 + F_2 \quad (2)$$

よって、軸方向の発生推力  $F_1$  は、(1) 式と (2) 式から求まる。

$$F_1 = \frac{(F_3 + F_4)}{2} \quad (3)$$

(3) 式は、可動子の同一位置における、往路の静推力と復路の静推力を平均することにより、発生推力が求まることを意味する。この発生推力は、軸方向に関する、永久磁石による推力と起磁力による推力の合力と考えられる。

励磁コイルに励磁電流を流さない状態（起磁力が 0 kA）で、静推力を同様に測定し、(3) 式から  $F_1$  を求める。この場合の  $F_1$  は、永久磁石単独により発生する推力であり、ディテント推力と表現される。発生推力とディテント推力の差から、軸方向に関する、励磁起磁力による推力を求めることができる。

#### 3.2 動推力の測定方法

動推力は、負荷に応じた速度で可動子を移動させる場合の動的な推力を示す。励磁コイルの直流の励磁電流は定電流源より印加する。起磁力の大きさと方向を一定にした状態で、可動子を上側から下側へ作動させながら、位置および推力はレーザ変位計やロードセルを用いて測定する。その波形は、同時データ記録装置（WR9000、グラフテック（株））を用い 500  $\mu$ s ごとに記録する。なお起磁力の大きさは、可動子を始動できなくなる

Table 1 Specifications of the linear oscillatory actuator

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| Stator size               | $\phi 150 \times 48$ (mm) |
| Mover size                | $\phi 58 \times 45$ (mm)  |
| Material                  | SS400                     |
| Permanent magnet material | Nd-Fe-B                   |
| (BH)max                   | 280 (kJ/m <sup>3</sup> )  |
| Number of turns           | 128 (turns)               |
| Magnetomotive force       | 5 (kA)                    |
| Stroke                    | 15 (mm)                   |
| Gap length                | 1 (mm)                    |

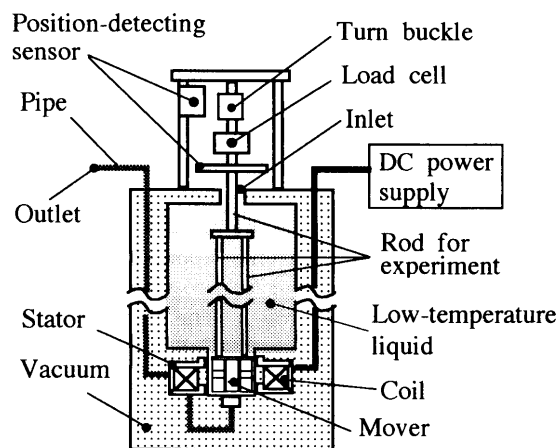


Fig. 2 Testing device for static thrust.

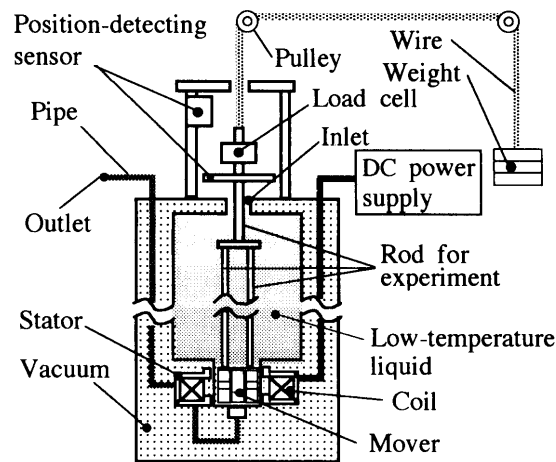


Fig. 3 Testing device for kinetic thrust.

まで、5 kA から 0.5 kA ごとに順次低くする。また起磁力の方向は、可動子を上側から下側へ作動させる方向である。Fig. 3 は動推力の測定装置を示す。静推力の測定装置におけるターンバックルの代わりに、ワイヤーとおもりを使用する。おもりは、可動子に対する慣性負荷になると同時に、ワイヤーに張力を与える。そのため、可動子が下側で反転する直前までの測定結果から、ここでの動推力は、次式により求めることとする。

$$F_5 = F_6 + m(\alpha - g) \quad (4)$$

ここに、 $F_5$  は動推力、 $F_6$  はロードセルで測定した推力、 $m$  は可動子の質量、 $\alpha$  は可動子の加速度、 $g$  は重力加速度である。可動子の速度と加速度は、可動子の始動後の経過時間  $t$  と可動子の位置  $z$  に関する回帰式  $z = f(t)$  を微分して求める。なお、実

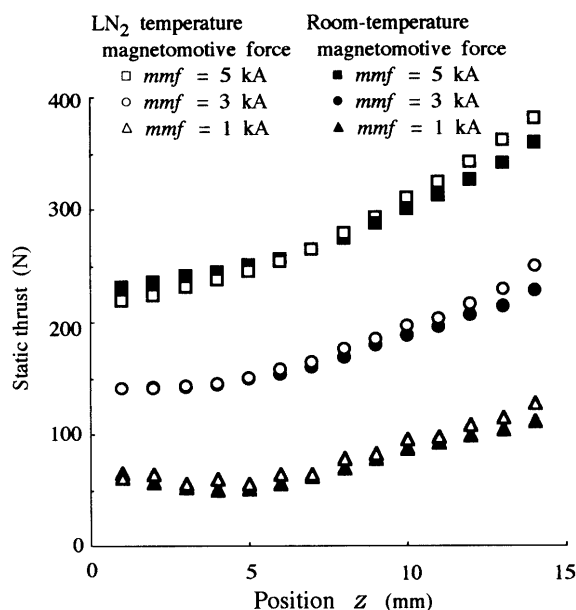


Fig. 4 Static thrust with respect to the position  $z$  at low and room-temperatures. The values of the magnetomotive force are 5 kA, 3 kA, and 1 kA.

験装置における可動子の質量  $m$  は 1.19 kg である。

#### 4. 液体窒素温度および常温における LOA の推力特性

##### 4.1 静推力特性

Fig. 4 は、液体窒素温度と常温時の可動子の位置に対する発生推力を示す。この発生推力は、軸方向に対するディテント推力と起磁力による推力の合力である。ポンプの要求仕様は、吐出圧力 1 MPa、ストローク 15 mm である。シリンダーの直径（内径）が 15 mm なので要求推力は 180 N になる。Fig. 4 から、起磁力 5 kA（定格）における LOA の発生推力は、液体窒素温度において、ポンプの要求仕様を満足することが確認された。

Fig. 5 は、液体窒素温度と常温時の可動子の位置に対するディテント推力を示す。各温度のディテント推力は、位置  $z=5$  mm 付近で最小になり、位置  $z=5$  mm から 14 mm において単調に増加する。これらの現象は、可動子と固定子の位置関係に起因すると考えられる。次にこの理由を探る。Fig. 6 に、位置  $z=5$  mm における可動子と固定子の位置関係の断面図を示す。Fig. 7 は、位置  $z=5$  mm と位置  $z=14$  mm において、有限要素法により求めた永久磁石単独による磁束流線図を示す。位置  $z=5$  mm 付近において、可動子の上側および下側の各磁極と、固定子の上側インダクタとの間に生じる各ディテント推力が、ほぼ均衡すると考えられる。しかしながら、可動子の下側磁極と、固定子の下側インダクタとの間に生じるディテント推力により、最小値がゼロにならないと考えられる。また、位置  $z=5$  mm と位置  $z=14$  mm の磁束流線図の比較から、固定子の上側および下側のインダクタに対して、可動子の上側および下側の磁極が各々対向する状態に近づくに従い、磁束流線は密になる傾向が確認される。よって、ディテント推力が、位置  $z=5$  mm 以降で増加すると考えられる。ディテント推力は、位置  $z=15$  mm 以降で減少し、固定子と可動子の対向する位置  $z=$

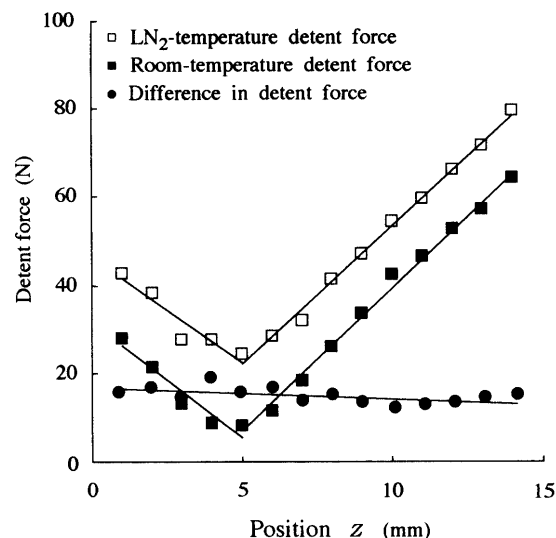


Fig. 5 Detent force with respect to the position  $z$  at low and room-temperatures. The magnetomotive force is 0 kA.

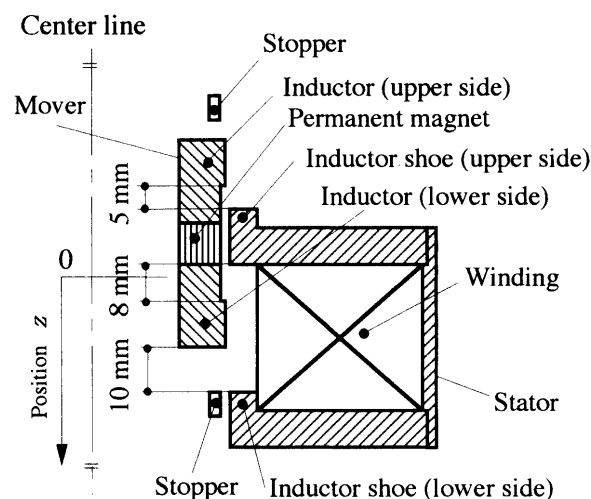


Fig. 6 Mover's position with respect to the stator at the position  $z=5$  mm.

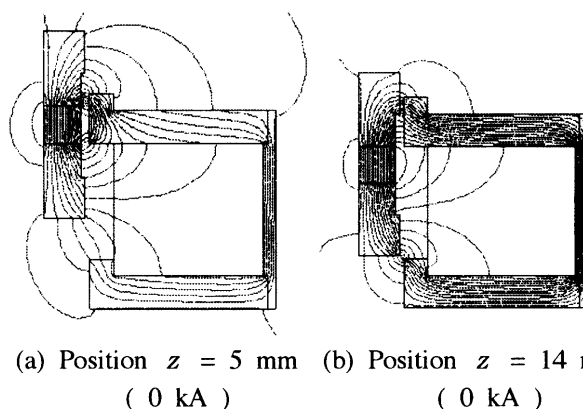


Fig. 7 Flux distribution at cross section by F.E.M.

23.5 mm で安定する。なお、ディテント推力を吐出圧力の増加にできるかぎり利用するため、可動子は位置  $z=0$  mm から 15 mm の区間において往復運動する。構造的には Fig. 6 に示すストッパーを設けた。

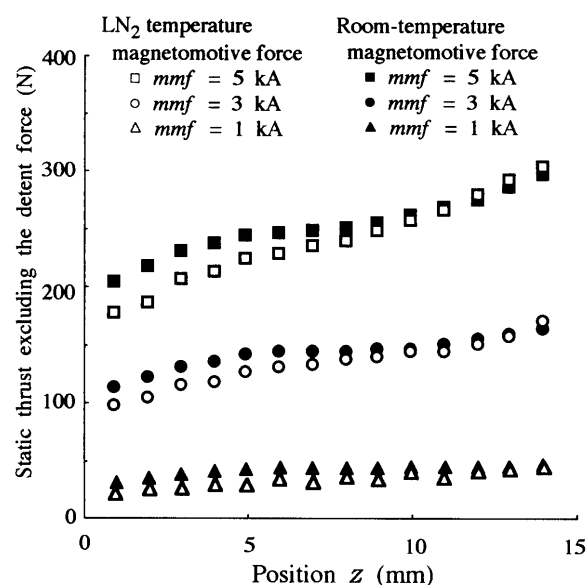


Fig. 8 Static thrust excluding the detent force with respect to the position  $z$  at low and room-temperatures. The values of the magnetomotive force are 5 kA, 3 kA, and 1 kA.

Fig. 5 には、可動子の同一位置における液体窒素温度のディテント推力と常温のディテント推力の差も示した。液体窒素温度のディテント推力と常温のディテント推力の差は、可動子の位置にかかわらずほぼ一定である。次にこの理由を探る。液体窒素温度と常温時の可動子の同一位置において、ディテント推力を変化させる要因に永久磁石の磁気特性の温度変化が考えられる<sup>4)</sup>。そして、磁性材料(SS400)の磁気特性の温度変化が考えられる。また、各温度において可動子の位置  $z=0$  mm から 15 mm でディテント推力を変化させる要因に、エアギャップの変化による動作点の変化が考えられる。具体的には Fig. 7 における磁束流線図の比較から、位置  $z=5$  mm より 14 mm において、エアギャップが短くなる傾向を確認できる。ディテント推力が、位置  $z=5$  mm 以降で増加する傾向を Fig. 5 において確認できる。しかしながら今回の測定結果だけでは、これら要因が液体窒素温度と常温のディテント推力の差に及ぼす影響割合を明確にできない。

Fig. 8 は、Fig. 4 の発生推力と Fig. 5 のディテント推力の差から求めた可動子の位置に対する起磁力による推力を示す。Fig. 9 に、起磁力に対する Fig. 8 の位置  $z=2$  mm および 11 mm における推力を示す。Fig. 10 は、液体窒素温度と常温時の可動子の位置に対する推力/起磁力比  $\beta$  を示す。この  $\beta$  は  $F=\beta \times mmf$  の回帰式を、Fig. 9 のデータに関して適用したときの  $\beta$  である。なお、 $F$  は起磁力による推力、 $mmf$  は起磁力である。位置  $z=1$  mm から 5 mm、位置  $z=5$  mm から 11 mm、位置  $z=11$  mm から 14 mm の各区間で、可動子の位置に対する  $\beta$  はリニアに変化する。液体窒素温度と常温の  $\beta$  の差は、位置  $z=1$  mm から 14 mm に近づくに従い、小さくなる傾向にある。そして  $\beta$  の値の大小関係が、逆転する状態が確認される。液体窒素温度と常温時の可動子の同一位置において、起磁力による推力を変化させる要因に磁性材料(SS400)の磁気特性の温度変化が考えられる。そして、各温度において可動子の

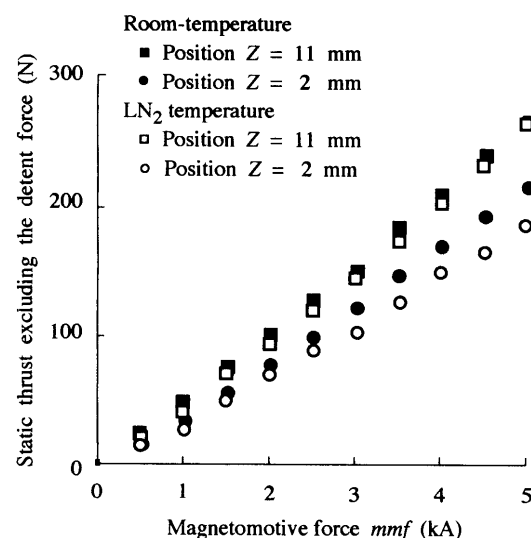


Fig. 9 Static thrust excluding the detent force with respect to the magnetomotive force  $mmf$  at low and room-temperatures.

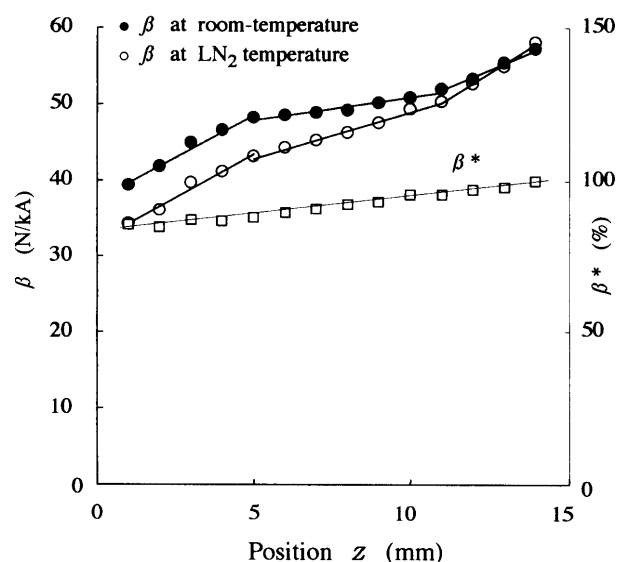
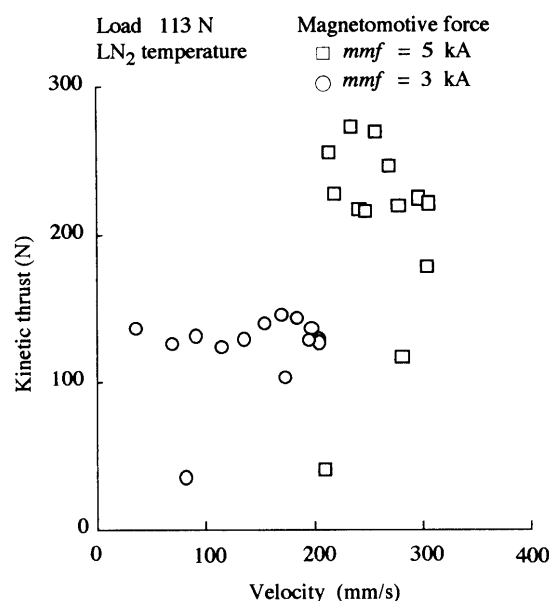


Fig. 10  $\beta$  with respect to the position  $z$  at low and room-temperatures.  $\beta$  is the static thrust divided by the magnetomotive force, and  $\beta$  that obtained by the least squares method is the slope of the line containing the origin.  $\beta^*$  is the value of  $\beta$  at low temperature divided by that at room-temperature.

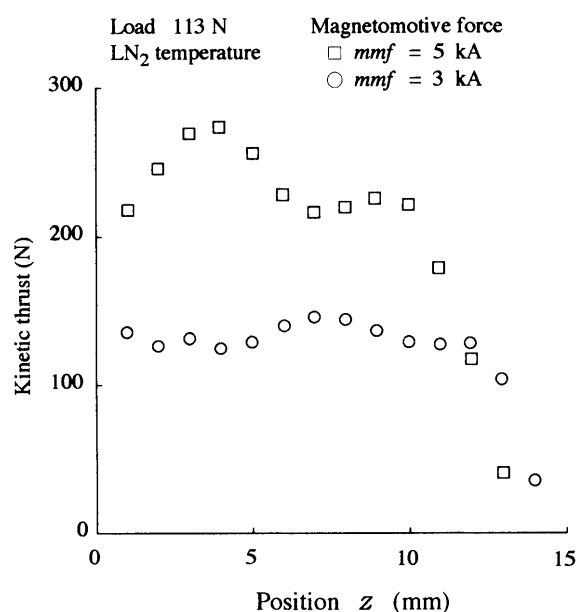
位置  $z=0$  mm から 15 mm で起磁力による推力を変化させる要因に、エアギャップの変化による動作点の変化が考えられる。また Fig. 8 から、推力値の大小関係の逆転する位置が、起磁力 5 kA と 3 kA で異なるので、起磁力の大きさも関連すると思われる。Fig. 10 に、常温の  $\beta$  に対する液体窒素温度の  $\beta$  の比率である  $\beta^*$  も示した。  $\beta^*$  は、可動子の位置に対してリニアに変化する傾向を確認できた。この結果から、低温と常温の推力の関係式が、低次の式で構成できると考えられる。この関係式と常温の推力から、液体窒素温度の推力を推定できる。

#### 4.2 動推力特性

LOA でポンプを駆動した場合の、動推力特性などについて述べる。ポンプが吐出する液体の抵抗は、液体の速度に関連す



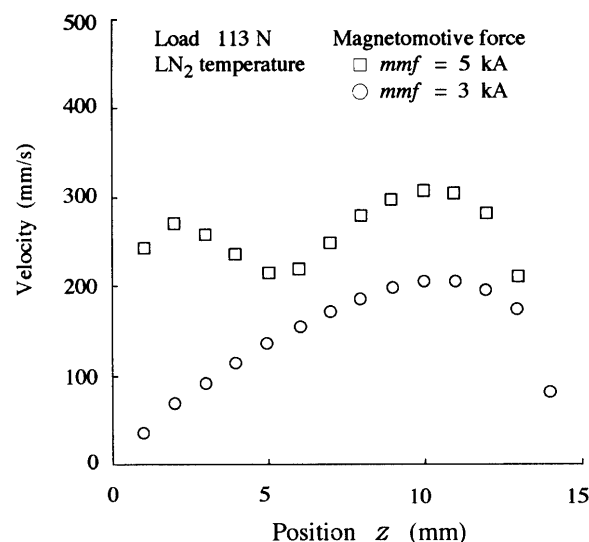
**Fig. 11** Kinetic thrust with respect to the velocity at low temperature. The load is 113 N. The values of the magnetomotive force are 5 kA and 3 kA.



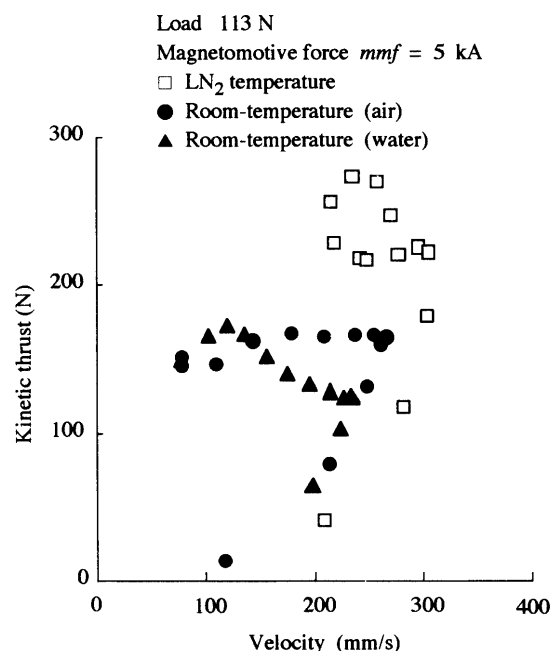
**Fig. 12** Kinetic thrust with respect to the position  $z$  at low temperature. The load is 113 N. The values of the magnetomotive force are 5 kA and 3 kA.

る。液体の抵抗を低減するため、可動子の速度特性は、可動子の位置に対して変動の小さい特性が適していると考えている。

Fig. 11 は、液体窒素温度時の負荷 113 N での可動子の速度に対する動推力を示す。Fig. 11 の動推力特性は、回転機の動推力特性と異なった傾向を示す。この理由は、エアギャップの相違と考えられる。回転機のエアギャップは均一であるが、本論文の LOA は、Fig. 7 の磁束流線図の比較から確認できるように、可動子の位置によってエアギャップが変化する。そのため、動推力および速度が、可動子の各位置において異なると考えられる。Fig. 12 は、液体窒素温度時の可動子の位置に対する動推力を示す。起磁力 5 kA の場合の動推力は、位置  $z = 1$  mm から



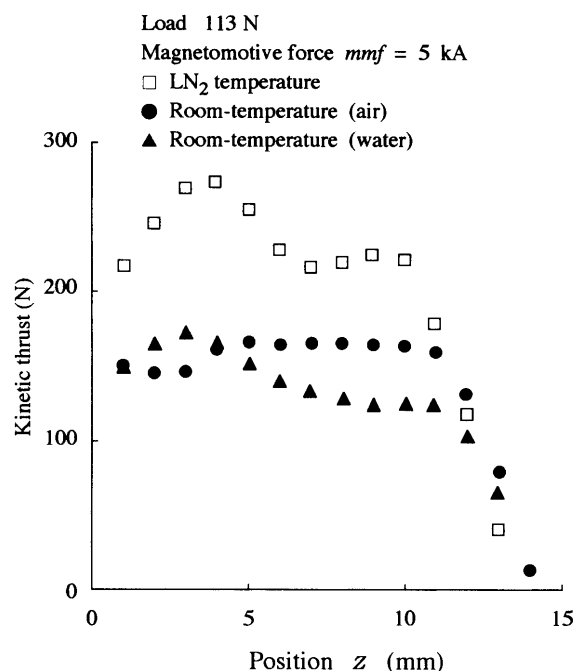
**Fig. 13** Velocity with respect to the position  $z$  at low temperature. The load is 113 N. The values of the magnetomotive force are 5 kA and 3 kA.



**Fig. 14** Kinetic thrust with respect to the velocity at low and room-temperatures. The load is 113 N. The magnetomotive force is 5 kA.

6 mm においてピーク値を示し、位置  $z = 6$  mm から 10 mm においてはほぼ一定である。Fig. 13 には、液体窒素温度時の可動子の位置に対する可動子の速度を示す。起磁力 5 kA の場合の可動子の速度は、可動子の位置に対してピーク値を示す。

Fig. 14 は、液体窒素温度と常温時の可動子の速度に対する動推力を示す。なお、ポンプが吐出する液体窒素の状態を推定するため、常温においてはポンプの吐出用に水および空気を使用した。Fig. 15 は、液体窒素温度と常温時の可動子の位置に対する動推力を示す。液体窒素温度の動推力特性は、常温（水）の動推力特性と同様な傾向と考えられる。よって、ポンプは液体に近い状態で窒素を吐出すると考えられる。Fig. 16 は、液体



**Fig. 15** Kinetic thrust with respect to the position  $z$  at low and room-temperatures. The load is 113 N. The magnetomotive force is 5 kA.

窒素温度と常温時の可動子の位置に対する可動子の速度を示す。可動子の速度が、位置  $z=10$  mm 付近で最大になる傾向がある。

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 15, および Fig. 16 から、液体窒素温度と常温時の動推力の低下の始まりは、可動子の速度が速いほど、位置  $z=1$  mm 側に近づく傾向にあると考えられる。

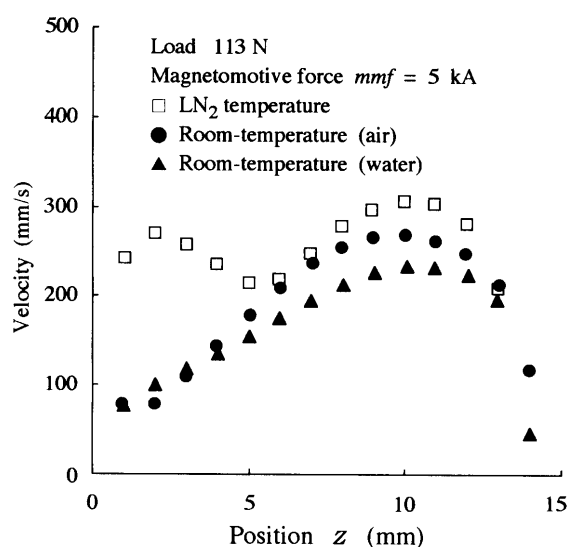
動推力特性の結果から、LOA によるポンプ駆動の特性向上と高効率化のために、今後解決すべき事項をまとめると、

- 可動子の位置に対する速度特性の平滑化（変動の小さい）
- 高効率化と低損失設計

となる。

## 5. ま と め

低温液体用ポンプの熱侵入を抑制し、小形軽量化を可能にするため、アクチュエーター一体ポンプを提案し、その可能性について論じた。そのために、シリンダ・ピストン形ポンプの駆動部に用いる可動永久磁石形 LOA を試作し、低温および常温時の推力特性を測定した結果、以下の点が明らかになった。



**Fig. 16** Velocity with respect to the position  $z$  at low and room-temperatures. The load is 113 N. The magnetomotive force is 5 kA.

- LOA により、シリンダ・ピストン形ポンプを非接触で駆動できることが確認された。
- 可動永久磁石形 LOA の推力特性は、低温と常温で異なることが確認された。この現象は、永久磁石（ネオジウム磁石）の磁気特性、および磁性材料 (SS400) の磁気特性の温度による変化に起因すると考えられる。

LOA を組込んだ低温液体ポンプの実現の可能性と、さらなる特性の向上が期待できることが判明した。今後、低温特性を考慮した磁気材料の選定、可動子の速度の特性を平滑にするため固定子や可動子の形状設計や、低損失設計などが必要と考える。

## 文 献

- 1) Y. Abe, A. Nakagawa, M. Watada, S. Torii, K. Yamane, and D. Ebihara: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 5025 (1996).
- 2) A. Aoki, M. Watada, S. Torii, K. Yamane, and D. Ebihara: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 2045 (1998).
- 3) 青木昭夫: 武蔵工業大学学位論文, p. 9 (1999).
- 4) Y. Otani, H. Miyajima, and S. Chikazumi: *IEEE Trans. Magn.*, **23**, 2527 (1987).

1999 年 7 月 6 日受理, 1999 年 12 月 14 日採録